

文章编号: 1672-8785(2014)02-0021-05

高重频激光干扰技术机理分析

华 磊 庄永峰 朱国利 郭 豹 杨寿佳

(中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州 450047)

摘 要: 在光电对抗领域, 高重频激光干扰是一种非常有效的干扰技术。从高重频激光干扰的原理出发, 通过对由干扰激光功率引起的激光导引头接收系统信噪比下降的现象进行理论分析和数值计算, 理清了以往对高重频激光干扰的认识。数值计算结果表明, 在目标距离一定的情况下, 导弹制导系统的信噪比会随干扰激光功率的增加而减小; 在激光干扰功率相同的情况下, 导弹制导系统的信噪比会随目标距离的增加而减小。在目标距离为 6000 m 的情况下, 当干扰激光功率大于 0.4 W 时, 导弹制导系统的信噪比降到 1 以下, 此时制导系统不能有效地从各种噪声之中检测出目标回波信号, 说明被攻击目标能够得到有效保护。

关键词: 激光干扰; 高重频; 类噪声; 信噪比

中图分类号: TJ765.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.02.004

Analysis of High Repetition Frequency Laser Jamming Technology

HUA Lei, ZHUANG Yong-feng, ZHU Guo-li, GUO Bao, YANG Shou-jia

(The 27th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450047, China)

Abstract: High repetition frequency laser jamming is a highly effective jamming technology in the field of opto-electronic countermeasure. Starting from the principle of high repetition frequency laser, the decrease of the signal-to-noise ratio (SNR) of the receiving system in a laser seeker caused by jamming laser power is analyzed theoretically and calculated numerically, and hence the previous overall understanding of high repetition frequency laser jamming is clarified. The numerical calculation result shows that for a missile guidance system, its SNR may be reduced with the increase of jamming laser power at a given distance and may be reduced with the increase of the target distance in the case of same jamming laser power. When the target is at the distance of 6000 m and the jamming laser power is greater than 0.4 W, the SNR of the missile guidance system may be reduced to less than 1. At this time, the missile guidance system can not detect the target echo signals from different noises, and so the target to be attacked can be protected effectively.

Key words: laser jamming; high-repetition-frequency; ambient signal; SNR

0 引言

从 1960 年第一台红宝石激光器诞生起到几十年后的今天, 激光技术已经发生了翻天覆地的

变化, 并已融入到了科技生产的每个角落中。而激光武器装备在军事领域也越发凸显出其重要的地位。作为武器系统的一个重要组成部分, 激光武器装备在激光测距机、激光制导导弹以

收稿日期: 2013-12-28

作者简介: 华磊 (1984-), 女, 河南南阳人, 本科, 工程师, 主要从事光电对抗方面的研究。E-mail: 29863086@qq.com

及光电侦察等设备上的运用,极大地提升了现有武器系统的性能水平。针对现代战争和未来战场上受到激光威胁日趋严重的现象,各个国家都在加大力度发展激光干扰防护技术^[1]。

激光半主动制导武器是现代战争中实现精确打击的最主要手段。在现有的激光制导武器对抗技术中,激光有源干扰技术主要可以分为激光角度欺骗干扰和高重频激光干扰两种。激光欺骗式干扰技术通过发射、转发或反射激光辐射信号,形成具有欺骗功能的激光干扰信号,以扰乱或欺骗敌方激光测距、观瞄、跟踪或制导系统,使其因获取错误的方位或距离信息而降低光电武器系统的作战效能。但随着激光制导武器窄波门设置和复杂编码等抗干扰技术的不断提高,激光角度欺骗干扰技术面临着越来越多的困难,而高重频激光干扰技术却由于拥有独特的优势而备受关注。目前,激光制导武器的两种抗干扰措施,即编解码技术和设置波门,均不能有效对付高重频激光干扰技术^[2]。

1 激光半主动制导及高重频激光干扰的原理

1.1 工作原理及抗干扰机理分析

激光半主动制导武器包括制导导弹、炸弹和炮弹,其制导系统由激光导引头和激光目标指示器两部分组成^[3]。图1为激光半主动制导武器的导引原理示意图。在激光半主动制导武器发射后,由机载、车载或单兵平台的目标指示器对目标发射一定束散角的指示激光;导引头接收到由目标表面漫反射产生的回波激光后,经过光电转换使其形成目标的方位信息,然后通过弹上控制系统修正弹体的飞行姿态,实现对目标的稳定跟踪,最终达到精确打击的目的^[4-5]。

激光导引头的抗干扰能力取决于滤光片组、波门选通和激光编码机制的有机组合程度。滤光片组是一种具备一定波长特性的光束过滤系统,它能够将除激光目标指示器发射的特定波长之外的光束滤除,然后根据预设的激光编

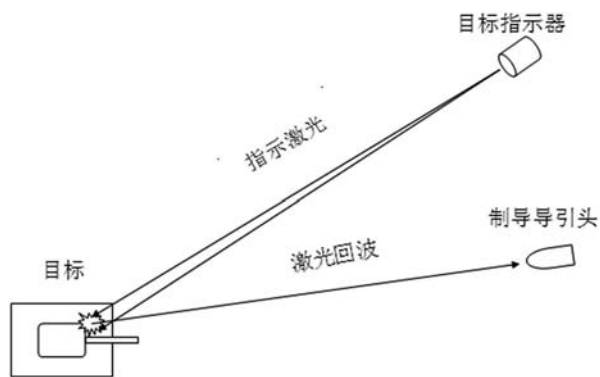


图1 激光半主动制导武器的导引原理示意图

码格式和波门选通机制,实现对目标指示器所发射激光的接收。在实际应用中,由于滤光片的作用有限,激光导引头的抗干扰措施主要为设置选通波门和预置编码。

波门选通机制可以分为固定型和实时型两种。图2为固定型波门的示意图。其中, $T_0 \sim T_m$ 为一组相关的激光脉冲制导信号。在得到激光导引头的确认后,将末脉冲激光信号 T_m 作为同步点,并根据预设的编码机制确定此后的波门开启时间,从而实现对后续激光脉冲信号($T_{m+1}, T_{m+2}, \dots$)的有效接收。与固定型波门选通机制不同,实时型波门选通机制以当前实际接收的激光脉冲信号作为后续波门的同步点,因此具有多个同步点,能够消除波门设置中的累计误差现象;同时,它可以将波门设置得较窄,使其具备良好的抗干扰能力。目前,大多数激光制导武器导引头均采用实时型波门选通机制。

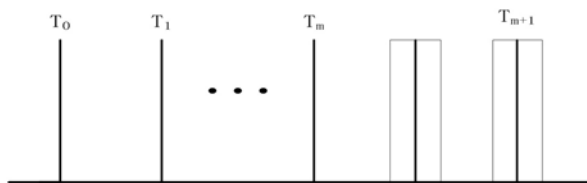


图2 固定型波门的示意图

预设编码是指按一定的编码格式对激光信号进行预先设定,从而实现激光导引头对激光目标指示器所发射激光的准确识别。其主要原理是,在一定的频率范围条件下,按照特定的算法设置激光目标指示器,使其发射带有特定规律的指示激光,然后激光导引头根据相应的编码规律,对指示激光进行解码计算,得到正确的

导引信息,同时实现抗干扰能力。

1.2 高重频激光干扰

实施激光有源干扰的实质是对激光导引头的信息处理部分进行干扰,所以干扰效果的好坏取决于干扰信号能否被导引头的信息部分认作己方的制导信号,或者是能否扰乱导引头的制导信息^[6]。根据激光导引头的工作机理及抗干扰措施可知,当其处于搜索状态时容易受到干扰,而处于锁定状态时则不易受到干扰。激光导引头在锁定状态时,干扰形成的条件如下:

(1) 干扰激光的波长和脉冲宽度等参数需要与被干扰的激光导引头接收的激光参数相同或者相近;

(2) 干扰激光的光束需要进入被干扰的激光导引头的接收视场;

(3) 干扰激光的激光脉冲需要进入被干扰激光导引头的选通波门。

当被攻击目标的激光探测设备探测到制导激光时,干扰设备会向探测方向发射高重频激光进行干扰,然后制导系统的探测器接收到干扰激光并产生光电流。由于高重频激光干扰信号具有随机噪声的特性,这种干扰方式称为类噪声干扰。这种干扰可以使制导系统的噪声迅速增大,信噪比下降,最终完全瘫痪,无法引导制导武器攻击目标。而被攻击目标便可由此得到保护。

2 高重频类噪声激光干扰机理分析

下面对高重频类噪声干扰激光进入激光导引头接收系统波门后引起接收系统信噪比变化的情况进行具体的数学分析。

2.1 导引头接收系统的噪声

若要准确进行激光制导,则必须对接收到的回波信号进行放大,从中检测出有效的目标信号,然后将其传给后端进行信息处理,并按照制导系统设计时定下的准确率和误码率要求形成控制指令,通过陀螺稳定平台控制弹体飞行。

导引头接收系统的噪声可以分为暗电流噪声、背景噪声和热噪声等几大类。高重频激光类

噪声属于暗电流噪声。

2.1.1 暗电流噪声

在无光照条件下,由于热激发作用,探测器的暗电流会随机产生电子所造成的起伏现象。由于起伏单元是电子电荷 e ,故称为散粒噪声。这种噪声存在于所有光电探测器中。通过理论计算,得出电流 i 产生的散粒噪声电压有效值为

$$V = \sqrt{2e i B F M R_L} \quad (1)$$

式中, e 为电子电量; B 为系统带宽; F 为倍增过程的噪声贡献。暗电流噪声和光子噪声都遵从这种模型。

探测器中存在暗电流,暗电流的噪声电压为

$$V_{ns} = \sqrt{2e I_s B F M R_L} \quad (2)$$

式中, I_s 为探测器的暗电流, $I_s = 2e M^2 B F i_d$; i_d 为探测器的漏电流。

2.1.2 背景噪声

当制导激光束照射到攻击目标以外的背景时(比如云层的后向反射、散射光斑的背景反射等等),经背景反射回来的激光被探测器接收,产生光电流。该电流也是随机起伏的。这里强调的是光子起伏,故将其称为光子噪声,也称为背景噪声。自然物背景(如阳光反射、炮火闪光等)经接收系统窄带滤光片滤光后较激光回波背景强度太弱,可以忽略不计。

由此计算背景噪声电压:

$$V_{nb} = \sqrt{2e I_b B F M R_L} \quad (3)$$

根据激光测距方程,可以推导出地面漫反射大气背景回波所产生的电流:

$$I_b = \frac{P_H \rho_0 \rho_i \rho_b e^{-2\alpha L} A_r \gamma}{\pi L^2} \quad (4)$$

式中, P_H 为制导系统发射的激光功率; ρ_0 为发射系统的光学透过率; ρ_i 为接收系统的光学透过率; ρ_b 为背景的漫反射系数; A_r 为接收系统的光学面积; L (km)为导引头与目标的距离; α 为大气对制导激光的衰减系数, $\alpha = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^{-n}$, $n = 0.585 V^{1/3}$ (其中 V (km)为大气能见度, λ (μm)为制导激光的波长)。

2.1.3 热噪声

系统负载中自由电子的随机运动会引起电流起伏。该行为与温度有关,这就会产生所谓的热噪声。

通过理论分析,可以得到热噪声有效电流、电压表达式为

$$I_{nt} = \sqrt{4KTBR_L} \quad (5)$$

$$V_{nt} = \sqrt{4KTBR_L} \quad (6)$$

式中, K 为玻尔兹曼常数; T 为系统的最高工作温度; B 为系统带宽。

2.2 类噪声激光干扰的计算分析

假设干扰系统的激光发射功率为 P_s , 发散角为 θ_s (mrad), 干扰设备光学系统的透光率为 ρ_s , 那么干扰激光照射到制导系统探测器上所产生的干扰电流为

$$I_d = \frac{P_s \rho_s \rho_i e^{-\alpha L} A_\gamma \gamma}{\pi (L \theta_s)^2} \quad (7)$$

干扰电流产生的噪声属于散粒噪声, 其噪声电压为

$$V_{nd} = \sqrt{2eI_d B F M R_L} \quad (8)$$

此时, 制导系统的噪声电压为

$$V_n = \sqrt{V_{ns}^2 + V_{nb}^2 + V_{nd}^2 + V_{nt}^2} \quad (9)$$

2.3 高重频类噪声激光干扰时信噪比的数值计算

假设制导系统发射激光的峰值功率为 P_t , 发散角为 θ_t (mrad), 被照射目标的平均表面法线与入射光的夹角为 θ , 那么, 根据激光测距方程, 可推导出面积为 A_i 的地面漫反射小目标回波照射到制导系统探测器上的电流信号为

$$I_t = \frac{4P_t \rho_s \rho_i \rho A_s A_i \gamma \cos \theta}{(\pi \theta_t L^2)^2} e^{-2\alpha L} \quad (10)$$

信号的优劣由信噪比 SNR 表示:

$$\text{SNR} = \left(\frac{V_s}{V_n}\right)^2 = \frac{(MI_t R_L)^2}{V_n^2} \quad (11)$$

式中, V_s 为信号电压; V_n 为噪声电压; M 为探测器内增益 (主要指 APD 雪崩探测器, 普通 PIN

光电探测器的增益为 1); γ 为系统响应度; R_L 为系统负载。

将式 (2)、式 (3)、式 (6) 以及式 (8) 代入式 (9) 和式 (11), 可以得到:

$$\text{SNR}_d = \frac{I_t^2}{2eF(I_s + I_b + I_d)B + 4kTB/M^2 R_L} \quad (12)$$

式 (12) 就是制导系统受到类噪声干扰以后的信噪比。

制导系统选用美国 Pacific Silicon Sensor 公司生产的 AD500-10 TO5i 型雪崩光电二极管探测器。经查表可知, 当 APD 探测器的倍增因子为 100 时, $1.06 \mu\text{m}$ 波长处的电流响应度为 40 A/W, 暗电流为 10 nA。利用式 (12) 进行数值计算时, 各参数的选择情况如下: $\gamma=40$ A/W, $M=100$, $F=4$, $i_d=10$ nA, $P_t=10^6$ W ($1.06 \mu\text{m}$ 激光的单脉冲能量为 10 mJ, 脉宽为 10 ns), $\rho_0 = \rho_i=0.8$, $\rho_b=0.3$, $B=200$ MHz, $R_L=10$ k Ω , $T=300$ K, $\theta=0$ mrad, 接收系统的光学直径 $\Phi=30$ mm, 漫反射小目标的直径 $D=2$ m。用 Matlab 软件及以上参数对不同目标距离下的导弹制导系统信噪比进行了仿真分析。

通过图 3 所示的数值计算结果可以看出, 在目标距离一定的情况下, 导弹制导系统的信噪比会随干扰激光功率的增加而减小; 在激光干扰功率相同的情况下, 导弹制导系统的信噪比会随目标距离的增加而减小。

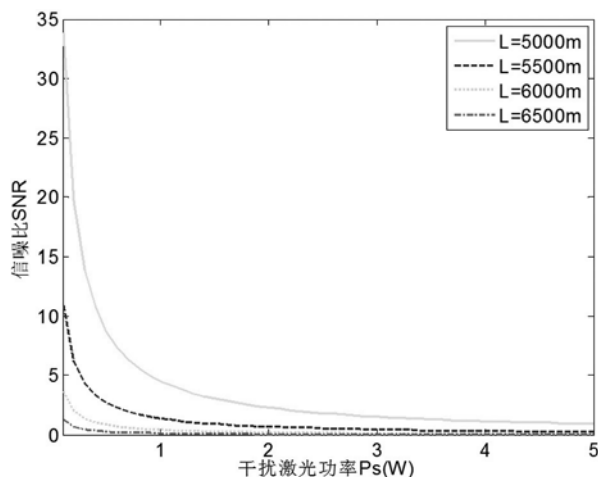


图 3 不同目标距离下信噪比随干扰激光功率的变化情况

以 6000 m 目标距离为例, 干扰激光功率为 0.4 W 时, 导弹制导系统的信噪比为 1; 当干扰激光功率大于 0.4 W 时, 导弹制导系统的信噪比降到 1 以下, 此时制导系统不能有效地从各种噪声之中检测出目标回波信号, 因此被攻击目标可得到有效保护。

3 结束语

本文对高重频激光干扰制导系统的干扰机理进行了分析, 对干扰前后制导系统的信噪比实施了计算机仿真计算, 并得出了以下结论: 高重频激光产生的类噪声干扰可以使制导系统的接收信噪比显著下降; 根据仿真计算结果可知, 在目标距离为 6000 m 的情况下, 当干扰激光功率大于 0.4 W 时, 导弹制导系统的信噪比降到 1 以下, 此时制导系统不能有效地从各种噪声中检测出目标回波信号, 因此被攻击目标能够得到

有效保护。该研究为深入研究高重频激光干扰和揭示其压制式干扰的作用机理提供了指导。

参考文献

- [1] 白峰. 激光有源欺骗式干扰技术现状与发展 [J]. 尖端科技, 2009, 12(6): 5-8.
- [2] 庄昕宇. 半主动激光精确末制导武器的发展现状与趋势 [J]. 舰船电子工程, 2011, 31(6): 6-10.
- [3] 鲍海阁. 国外激光半主动寻的制导武器的发展 [J]. 舰船电子工程, 2010, 30(5): 21-25.
- [4] 葛宝臻. 基于四象限探测的激光粒度仪自动对中技术 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(11): 2384-2389.
- [5] 赵馨. 四象限探测器的特性测试 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2164-2170.
- [6] 童忠诚. 基于弹道仿真的激光高重频干扰技术探讨 [J]. 光电与控制, 2008, 26(3): 15-18.
- [7] 郭修煌. 精确制导技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [8] 李鸣. 航天工程手册 (航电综合类) [M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.
- [9] 蔡禾, 郭雪娇, 和挺, 等. 太赫兹技术及其应用研究进展 [J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(3): 209-222.
- [10] 王华泽, 吴晗平, 吕照顺, 等. 太赫兹成像系统分析及其相关技术研究 [J]. 红外技术, 2013, 35(7): 391-397.
- [11] 王兵兵, 侯丽伟, 谢巍, 等. 太赫兹成像准光学系统设计 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(6): 1561-1565.
- [12] 李梅. 15 ~ 38 μm 太赫兹波成像光学系统设计研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2006.
- [13] 姚睿, 丁胜晖, 李琦, 等. 2.52 THz 面阵透射成像系统改进及分辨率分析 [J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0111001.
- [14] Robert Bogue. Terahertz Imaging: A Report on Progress [J]. Sensor Review, 2009, 29(1): 6-12.
- [15] Nielsen K, Rasmussen H K, Adam A J L, et al. Bendable, Low-loss Topas Fibers for the Terahertz Frequency Range [J]. Optical Society of America, 2009, 17(10): 8592-8601.
- [16] 姬江军, 范文慧, 孔德鹏, 等. 环烯烃共聚物太赫兹透镜的设计、制备及特性分析 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(5): 1212-1217.
- [17] 刘英, 潘玉龙, 王学进, 等. 谐衍射 / 折射太赫兹多波段成像系统设计 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2065-2071.
- [18] Timothy Pope, Michel Doucet, Fabien Dupont, et al. Uncooled Detector, Optics, and Camera Development for THz Imaging [C]. SPIE, 2009, 7311: 819923.

(上接第 20 页)

与文献 [9] 相比, 本文设计的光学系统没有采用衍射元件, 更加便于实际加工及应用。该系统各视场的 MTF 均接近衍射极限, 像质优良。当 CCD 的截止频率为 10 cy/mm 时, 各视场的 MTF 大于 0.16, 远大于人眼的韦伯比 (0.02), 优于国外的同类系统 (文献 [10] 中, 当 CCD 的截止频率为 10 cy/mm 时, 各视场的 MTF 均小于 0.05)。本文系统的相对口径大, F 数为 1, 有利于对微弱信号的探测, 满足 THz 成像系统对光能量的要求。

参考文献

- [1] 蔡禾, 郭雪娇, 和挺, 等. 太赫兹技术及其应用研究进展 [J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(3): 209-222.
- [2] 王华泽, 吴晗平, 吕照顺, 等. 太赫兹成像系统分析及其相关技术研究 [J]. 红外技术, 2013, 35(7): 391-397.
- [3] 王兵兵, 侯丽伟, 谢巍, 等. 太赫兹成像准光学系统设计 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(6): 1561-1565.
- [4] 李梅. 15 ~ 38 μm 太赫兹波成像光学系统设计研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2006.
- [5] 姚睿, 丁胜晖, 李琦, 等. 2.52 THz 面阵透射成像系统改进及分辨率分析 [J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0111001.
- [6] Robert Bogue. Terahertz Imaging: A Report on Progress [J]. Sensor Review, 2009, 29(1): 6-12.
- [7] Nielsen K, Rasmussen H K, Adam A J L, et al. Bendable, Low-loss Topas Fibers for the Terahertz Frequency Range [J]. Optical Society of America, 2009, 17(10): 8592-8601.
- [8] 姬江军, 范文慧, 孔德鹏, 等. 环烯烃共聚物太赫兹透镜的设计、制备及特性分析 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(5): 1212-1217.
- [9] 刘英, 潘玉龙, 王学进, 等. 谐衍射 / 折射太赫兹多波段成像系统设计 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2065-2071.
- [10] Timothy Pope, Michel Doucet, Fabien Dupont, et al. Uncooled Detector, Optics, and Camera Development for THz Imaging [C]. SPIE, 2009, 7311: 819923.